

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 08. 015

基于可拓分析的轨道车辆齿轮箱可靠性评估

刘玉梅^{1,2}, 赵聪聪¹, 熊明烨³, 卢政旭¹

(1. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022 ; 2. 长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062 ;
3. 伊利诺伊大学厄巴纳 - 香槟分校 自由艺术与科学学院, 伊利诺伊州 厄巴纳 - 香槟市 61801)

摘 要 : 采用可拓分析方法研究轨道车辆齿轮箱在线路运行时的可靠性评估问题. 基于可拓理论的蕴含及可扩分析方法对齿轮箱可靠性物元进行分析, 设定其可靠性评估的上位目标和下位目标, 建立基于齿轮箱结构部件运行状态的比例故障率模型, 应用粒子群优化算法对故障率模型进行参数的极大似然估计, 以参数估计结果为基础, 构建各部件的可靠性物元, 进而实现对齿轮箱可靠性的整体评估. 分析实例表明, 在齿轮箱的当前运行状态下, 大齿轮轴承 I 和小齿轮的可靠性相对较低, 是行车中应重点监测的部件.

关 键 词 : 轨道车辆, 齿轮箱, 可拓理论, 可靠性评估, 比例故障率模型, 粒子群优化

中图分类号: TH 114 ;U 260. 332 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 3026(2016)08 - 1133 - 05

Reliability Assessment of Railway Vehicle Gearbox Based on Extension Analysis

LIU Yu-mei^{1,2}, ZHAO Cong-cong¹, XIONG Ming-ye³, LU Zheng-xu¹

(1. College of Traffic , Jilin University , Changchun 130022 , China ; 2. Changchun Railway Vehicle Co. , Ltd. , Changchun 130062 , China ; 3. College of Liberal Art and Science , University of Illinois at Urbana-Champaign , Champaign-Urbana 61801 , USA. Corresponding author : LIU Yu-mei , E-mail : lymlls@ 163. com)

Abstract : The extension method was adopted to analyze the reliability assessment problems of railway vehicle gearbox during its line operation. The matter-element model of gearbox reliability was studied based on the contained analysis and scalability analysis method of the extenics theory , and the lower/upper reliability targets of the gearbox reliability assessment were set. The proportional hazards models(PHMs) were established based on the component 's operating state , and the particle swarm optimization(PSO) algorithm was used to obtain the parameters of PHMs by means of maximum likelihood estimation. On the basis of parameters evaluation results , the matter-element models of components were established. At last , the reliability of the railway vehicle gearbox was evaluated. The result shows that under current operating state of gearbox , the reliability of the large gear bearing I and pinion are relatively lower , which are the main monitoring components in the railway vehicle line operation.

Key words : railway vehicle ; gearbox ; extenics theory ; reliability assessment ; proportional hazards model ; PSO (particle swarm optimization)

走行部是轨道车辆最重要的组成系统之一, 承担支撑车体重量及列车走行的重要使命, 是影响列车动力性、行驶安全性及稳定性的关键系统^[1]. 作为走行部的关键部件, 由于轨道不平顺的作用, 齿轮箱在列车高速行驶时将承受各种振动、冲击和作用力, 致使齿轮箱的运行工况恶化.

齿轮箱的可靠性将直接影响列车的安全运行^[2]. 对齿轮箱进行可靠性分析一直是困扰轨道车辆设计者和使用者的难题, 也是保障轨道车辆安全运行所亟待解决的问题. 因此确定齿轮箱在列车运行过程中的可靠性和疲劳寿命是机车车辆结构疲劳设计的重要发展方向之一^[3].

可拓学利用物元描述客观事物^[4],通过对物元进行相关、蕴含、发散、可扩等分析,寻求解决矛盾问题的方法.可拓分析和可拓变换是可拓学用于分析解决矛盾问题所采用的基本分析原理与方法.可拓分析作为一种新的动态综合分析方法,已经应用于生态环境评价、不正常航班管理预警、环境质量综合评判、地震预报综合评判等领域^[5].

本文基于可拓学理论建立齿轮箱及其各组成结构的可靠性物元模型,通过对齿轮箱可靠性物元进行蕴含分析和可扩分析,设定齿轮箱可靠性评估过程的上位目标和下位目标,通过提取齿轮箱各结构部件振动加速度信号的特征参数,建立基于部件运行状态的比例故障率模型,并依据参数的极大似然估计法,采用粒子群优化算法确定各结构部件的比例故障率模型参数,建立齿轮箱各组成结构的可靠性物元模型,进而实现对齿轮箱的整体可靠性评估.

1 齿轮箱可靠性评估的可拓分析方法

1.1 可拓分析方法

可拓学用形式化工具对不相容问题的内在矛盾机制进行研究.物元是可拓学的逻辑细胞,用有序三元数组 $R = (N, C, V)$ 表示^[6],其中 N 是事物, C 是事物的特征, V 是事物关于 C 的量值.

蕴含分析和可扩分析是物元分析的两个基本方法.蕴含分析指若物元 B_1 实现,必有物元 B_2 实现,则称 B_1 蕴含 B_2 ,记 $B_1 \Rightarrow B_2$, B_1 称为下位物元, B_2 称为上位物元.可扩分析包括物元的可组合性、可分解性及可扩缩性,通过对物元信息的组合和分解,寻求解决实际矛盾问题的方法和途径.

1.2 齿轮箱可靠性分析

可靠性分析指标包括可靠度、可靠寿命、失效率、平均寿命、平均故障间隔时间等.可靠度是零部件在规定使用条件下和规定使用时间内或走行公里内不发生失效的概率,直接反映部件的可靠性^[7].本文选用可靠度作为轨道车辆齿轮箱及其各组成结构的可靠性评估参数,根据物元定义得到齿轮箱的可靠性物元模型:

$$R_G = (O, c, \nu). \tag{1}$$

式中: O 表示齿轮箱; c 表示可靠度; ν 表示齿轮箱的可靠度量值.

齿轮箱各组成部件的可靠性物元模型表示为

$$R_i = (O_i, c, \nu_i). \tag{2}$$

式中: O_i 表示齿轮箱的各组成部件; ν_i 表示部件 O_i 的可靠度数值.

根据物元的可分解性,对齿轮箱可靠性物元进行如下变换:

$$(O, c, \nu) / \{(O_1, c, \nu_1), \dots, (O_n, c, \nu_n)\}. \tag{3}$$

式(3)可描述为,将齿轮箱的整体可靠性视为上位目标,各结构部件的可靠性视为下位目标,通过对各部件的可靠性分析实现齿轮箱的整体可靠性评估,用可拓学的“与”蕴含关系描述为

$$(R_1 \wedge R_2 \wedge \dots \wedge R_n) \Rightarrow R_G. \tag{4}$$

2 比例故障率模型及其参数估计

2.1 比例故障率模型

比例故障率模型是反映装备运行状态参数与完好度之间关系的经典模型,能够有效将状态信息用于可靠性评估,具体表示如下^[8-9]:

$$h(t, Z) = h_0(t) e^{\gamma Z}. \tag{5}$$

式中: $h_0(t)$ 为仅与时间有关的基本故障率; Z 为协变量,即设备的运行状态参数; γ 为回归参数,反映 Z 对设备故障率的影响.

故障率与可靠度之间存在如下关系:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{d(1 - R(t))}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = - \frac{d}{dt} \ln(R(t)). \tag{6}$$

将式(5)代入式(6)并整理,得到比例可靠度函数:

$$R(t, Z) = \exp\left(- \int_0^t h(t, Z) dt\right). \tag{7}$$

2.2 PSO 参数估计

粒子群优化(PSO)算法通过在可行解空间中追踪个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 来更新个体位置.粒子的速度和位置更新公式如下^[10]:

$$\left. \begin{aligned} v_{id}^{(k+1)} &= w^{(k+1)} v_{id}^{(k)} + \alpha_1 r_1 (P_{best, id}^{(k)} - X_{id}^{(k)}) + \\ &\quad \alpha_2 r_2 (G_{best}^{(k)} - X_{id}^{(k)}), \\ X_{id}^{(k+1)} &= X_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)}. \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式中: $v_{id}^{(k)}$, $X_{id}^{(k)}$ 为第 k 次迭代中,第 i 个粒子第 d 维的速度和位置; α_1 , α_2 为加速因子,取值在 1~2 之间; r_1 , r_2 为 [0, 1] 区间的随机数; w 为惯性权重:

$$w^{(k)} = \frac{t}{T_{max}} (w_{fin} - w_{ini}) + w_{ini}. \tag{9}$$

式中: w_{ini} 为初始权重; w_{fin} 为最终权重; t 为当前迭

代次数 T_{\max} 为最大迭代次数。

在应用 PSO 算法估计比例故障率模型参数时,应首先确定算法的适应度函数。设待估计参数序列为 θ ,则似然函数表示为

$$L(\theta) = \prod_{i \in F} f(t_i, \theta) \prod_{i \in C} R(t_i, \theta). \quad (10)$$

式中 F 为失效集, C 为截尾集。

对式 (10) 两边取对数：

$$\ln(L(\theta)) = \sum_{i=1}^{n_f} \ln[f(t_i, \theta)] + \sum_{i=1}^{n_b} \ln[R(t_i, \theta)]. \quad (11)$$

式中 n_f 为失效数据个数, n_b 为截尾数据个数。

由于 $L(\theta)$ 与 $\ln(L(\theta))$ 同时取得极值,故将式 (11) 作为粒子群优化算法的适应度函数,即

$$F = \min\{-\ln(L(\theta))\}. \quad (12)$$

3 齿轮箱可靠性评估

3.1 齿轮箱可靠性模型

图 1 所示为某架悬式高速列车转向架的齿轮箱结构,其中从动大齿轮直接压装在车轴上,主动小齿轮安装在齿轮箱的输入轴上,力和转矩经从动大齿轮传递至车轴。除图 1 所标注的主要部件外,齿轮箱组成结构还包括轴承端盖及螺栓等。

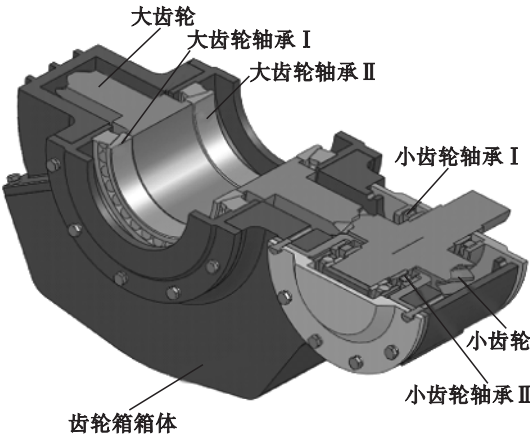


图 1 高速列车齿轮箱结构

Fig. 1 Structure of the high-speed train gearbox

由于各结构部件的功能不同,且对齿轮箱的整体可靠性作用不同,因此不能将所有组成部件等同对待。根据列车实际线路运行故障统计及仿真试验模拟结果知,小齿轮、小齿轮轴承 I 和 II、大齿轮、大齿轮轴承 I 和 II 是齿轮箱损伤较为严重的部件。此外,在对齿轮箱进行室内试验的模拟分析发现,齿轮箱箱体断裂也是齿轮箱经常发生的故障之一,故本文利用上述部件分析齿轮箱的整体可靠性,其可靠性简化模型如图 2 所示。



图 2 齿轮箱可靠性简化模型

Fig. 2 Simplified reliability model of gearbox

3.2 齿轮箱可靠性评估

在列车实际运行过程中,部件的振动信号能够反映其运行状态。利用振动加速度传感器监测图 2 所示齿轮箱各部件在垂直方向的振动加速度信号。由于时域无量纲参数指标基本不受载荷和转速等因素的影响,故选取时域无量纲指标——峭度作为描述图 2 各部件运行状态的特征参数。

数据采集系统的采样频率为 2 048 Hz,每组采样点数为 1 231 104,即每次试验采样时间为 601.13 s。截取其中的 200 000 数据点进行分析,按每 4 000 个数据点计算一次峭度,得到关于峭度的 50 个序列值,以此作为反映部件运行状态的时间序列。图 3 所示为小齿轮轴承 I 的振动加速度信号及其相应的峭度指标,齿轮箱其他部件的运行状态指标提取方法类似。

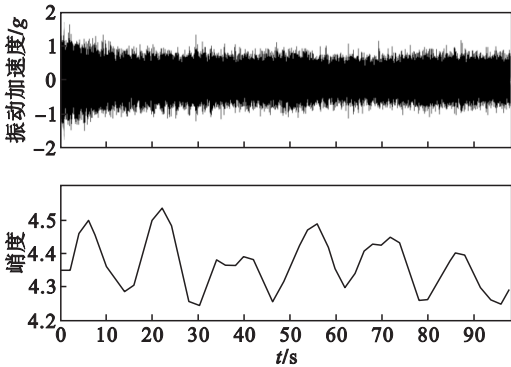


图 3 小齿轮轴承 I 的时域特征指标

Fig. 3 Time domain characteristic parameters of pinion bearing I

威布尔分布是最具普遍性和典型性的一种失效模型,在实际工程中被广泛应用于建立机械零部件的失效模型。设图 2 中齿轮箱各部件的失效分布服从威布尔分布,即各结构部件的故障率函数为

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}. \quad (13)$$

式中 β 为形状参数, η 为尺度参数。

进一步得到比例故障率模型和比例可靠度函数如下：

$$h(t|Z) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{\gamma Z}, \quad (14)$$

$$R(t|Z) = \exp\left(-\int_0^t h(t|Z) dt\right) =$$

$$\exp\left(-\int_0^t \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\gamma Z} dt\right). \quad (15)$$

根据本文所选取的部件运行状态指标 ,式 (15)中 Z 表示部件运行状态的峭度值.

将式 (14)、式 (15)代入式 (11) ,并对其两边取对数得

$$\ln(L(\theta)) = n_f \ln\left(\frac{\beta}{\eta}\right) + \sum_{i=1}^{n_f} \ln\left(\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1}\right) + \sum_{i=1}^{n_f} \gamma Z(t_i) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta} e^{\gamma Z(t_i)}.$$

(16)

将式 (16)代入式 (12) ,即可得到基于最大似然估计法的 PSO 算法的适应度函数.

以图 3 所示的小齿轮轴承 I 的峭度值为例 ,以式 (12)作为适应度函数 ,采用 PSO 算法对小齿轮轴承 I 的比例故障率模型进行参数估计 ,其最佳适应度值变化曲线如图 4 所示.

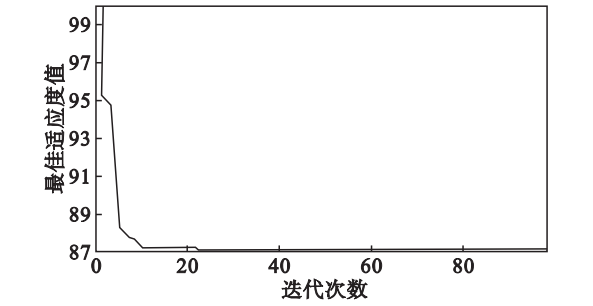


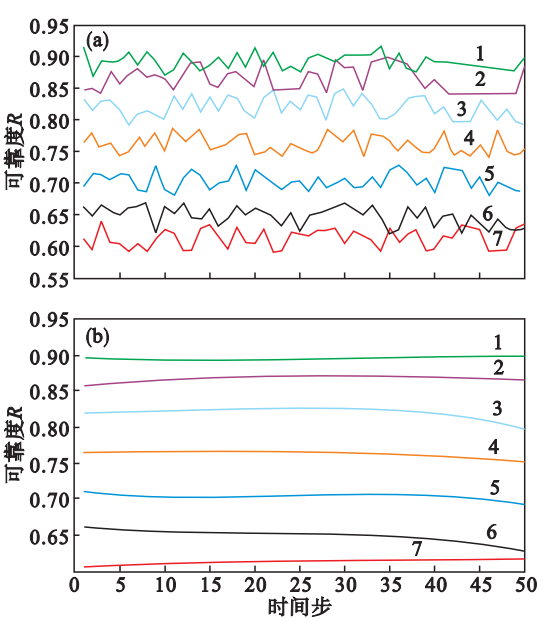
图 4 小齿轮轴承 I 的最佳适应度变化曲线
Fig. 4 Best fitness change curve of pinion bearing I

采用类似方法对图 2 齿轮箱其他部件的比例故障率模型进行参数估计 ,结果见表 1.

表 1 齿轮箱各结构部件的参数估计值
Table 1 Parameter estimation of the components in gearbox

部件	β	$\eta \times 10^{-5}$	γ
大齿轮	1.16	9.72	2.19
大齿轮轴承 I	1.56	9.51	3.21
大齿轮轴承 II	1.51	1.01	1.69
小齿轮轴承 I	1.45	9.56	3.93
小齿轮	1.47	10.5	3.78
小齿轮轴承 II	1.39	44.3	3.57
齿轮箱箱体	1.01	3.07	1.85

将表 1 的参数估计结果代入式 (15) ,得到齿轮箱各结构部件的比例可靠度模型 ,进而可以得到各部件在任意时刻的可靠度.图 5 所示为齿轮箱各结构部件的可靠性评估曲线.



1—大齿轮轴承II ;2—小齿轮轴承II ;3—小齿轮轴承I ;
4—齿轮箱箱体 ;5—大齿轮 ;6—小齿轮 ;7—大齿轮轴承I.

图 5 齿轮箱各结构部件的可靠性评估曲线
Fig. 5 Reliability assessment curves for components in gearbox

(a)—离散可靠度曲线 ;(b)—最小二乘法拟合可靠度曲线.

由图 5 可得到各部件的可靠性物元模型 :

- $R_1 = (\text{大齿轮}, \text{可靠度 } 0.72) ;$
- $R_2 = (\text{大齿轮轴承 I}, \text{可靠度 } 0.61) ;$
- $R_3 = (\text{大齿轮轴承 II}, \text{可靠度 } 0.90) ;$
- $R_4 = (\text{小齿轮轴承 I}, \text{可靠度 } 0.83) ;$
- $R_5 = (\text{小齿轮}, \text{可靠度 } 0.65) ;$
- $R_6 = (\text{小齿轮轴承 II}, \text{可靠度 } 0.87) ;$
- $R_7 = (\text{齿轮箱箱体}, \text{可靠度 } 0.77).$

设齿轮箱为串联系统 ,则齿轮箱的整体可靠性物元 $R_G = (\text{齿轮箱}, \text{可靠度 } 0.143)$,即齿轮箱的整体可靠度为 0.143 ,且在当前运行状态下 ,大齿轮轴承 I 和小齿轮的可靠性相对较低 ,是车辆运行中应重点监测的部件.

4 结 论

1) 基于可拓分析方法 ,对轨道车辆齿轮箱的可靠性物元模型进行分析 ,通过对各组成部件的可靠性分析实现对齿轮箱的整体可靠性评估.

2) 建立基于部件运行状态的比例故障率模型 ,采用 PSO 算法对故障率模型进行参数的极大似然估计 ,进而确定部件在任意时刻的可靠度 ,为齿轮箱整体的可靠性评估奠定基础.

3) 对轨道车辆齿轮箱的可靠性评估结果表明 ,在当前运行状态下 ,被试齿轮箱的整体可靠度

为 0.143 ,且大齿轮轴承 I 和小齿轮的可靠性相对较低 ,是车辆运行中应重点监测的部件.

参考文献：

[1] Dong Z W ,Wu J ,Du X J. Research on fatigue life prediction of gear box in caterpillar based on running simulation test [J]. *Vibration ,Structural Engineering and Measurement* II , 2012 ,226/227/228 :627 – 631.

[2] 范军 ,宋瑞 ,谷安斯 ,等. 高速动车组齿轮箱体振动特性研究 [J]. 铁道技术监督 ,2013 ,41(12) :31 – 34 .40.

(Fan Jun ,Song Rui ,Gu An-si ,et al. The study of the vibration characteristics for the high-speed train gearbox[J]. *Railway Quality Control* 2013 ,41(12) :31 – 34 .40.)

[3] Humberto H ,Hedayati K S ,Gérard-André C. Torsional-vibration assessment and gear-fault diagnosis in railway traction system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2011 ,58(5) :1707 – 1717.

[4] Dong J ,Qi L. Extenics analysis of activity support element [J]. *Advanced Materials Research* 2012 ,368/369/370/371/372/373 :3727 – 3731.

[5] 蔡文 ,杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报 ,2013 ,58(13) :1190 – 1199.

(Cai Wen ,Yang Chun-yan. Basic theory and methodology on

extenics[J]. *Chinese Science Bulletin* 2013 ,58(13) :1190 – 1199.)

[6] Yang J ,Gao H ,Liu W. Evaluation of land grading based on extenics theory [C]//2012 IEEE 2nd International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems. Hangzhou 2012 :1263 – 1266.

[7] Liu K T ,Tang A P. The solution of the structural reliability index based on SAPSO [J]. *Applied Mechanics and Materials* 2012 ,138/139 :410 – 415.

[8] Carstens W A ,Vlok P J. Statistical analysis of caterpillar 793D haul truck engine data and through-life diagnostic information using the proportional hazards model[J]. *South African Journal of Industrial Engineering* ,2013 ,24(2) :59 – 68.

[9] Samrout M ,Chatelet E ,Kouta R ,et al. Optimization of maintenance policy using proportional hazard model[J]. *Reliability Engineering and System Safety* ,2009 ,94(1) :44 – 52.

[10] 魏秀业. 基于粒子群优化的齿轮箱智能故障诊断研究 [D]. 太原 : 中北大学 ,2009.

(Wei Xiu-ye. Research on intelligent diagnosis of gearbox fault based on particle swarm optimization[D]. Taiyuan : North University of China 2009.)

(上接第 1121 页)

参考文献：

[1] 倪升起 ,彭世恒 ,仇圣桃 ,等. 电磁制动技术的发展及在板坯连铸结晶器中的应用 [J]. 连铸 ,2009 ,34(1) :40 – 43.

(Ni Sheng-qi ,Peng Shi-heng ,Qiu Sheng-tao ,et al. Development of electromagnetic brake technique and application in slab continuous casting mold [J]. *Continuous Casting* 2009 ,34(1) :40 – 43.)

[2] 赵勇慧. 连铸过程中金属液流动的电磁控制 [D]. 大连 :大连理工大学 ,2002.

(Zhao Yong-hui. Electromagnetic control of molten metal flow in continuous casting process [D]. Dalian :Dalian University of Technology 2002.)

[3] Ji C B ,Li J S ,Tang H Y ,et al. Effect of EMBr on flow in slab continuous casting mold and evaluation using nail dipping measurement [J]. *Steel Research International* , 2013 ,84(3) :259 – 268.

[4] Cho S M ,Kim S H ,Thomas B G. Transient fluid flow during steady continuous casting of steel slabs :part II [J]. *ISIJ International* 2014 ,54(4) :855 – 864.

[5] Halldin A. The electromagnetic brake (EMBr) for slab continuous casting machines [C]// Steelmaking Conference Proceedings. Atlanta Iron and Steel Society of AIME ,1983 :123 – 126.

[6] Nagai J ,Suzuki K I ,Kojima S ,et al. Steel flow control in a high-speed continuous slab caster using an electromagnetic

brake [J]. *Iron and Steel Engineer* ,1984 ,61(5) :41 – 47.

[7] Van der Plas D W ,Moon W H L ,Biesboer P. Metallurgical investigations of the EMBr on slab caster No. 22 at Hoogovens Ijmuiden [C]//International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. Nagoya ,1994 :384 – 389.

[8] 李菲 ,王恩刚 ,冯明杰. 全幅一段电磁制动连铸结晶器内钢液的模拟研究 [C]//第十八届全国炼钢学术会议. 北京 :中国金属学会炼钢分会 ,2014 :150.

(Li Fei ,Wang En-gang ,Feng Ming-jie. Simulation of molten steel in continuous casting mold with EMBr-Rule[C]//The 18th CSM Annual Steelmaking Conference Proceedings. Beijing Steelmaking Committee of CSM 2014 :150.)

[9] Wang E G ,Li F ,He J C. Numerical simulation of magnetic field and fluid flow in continuous casting mold with vertical electromagnetic brake [C]//Proceedings of the 8th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD. Corsica 2011 :683 – 687.

[10] Ha M Y ,Lee H G ,Seong S H. Numerical simulation of three-dimensional flow ,heat transfer and solidification of steel in continuous casting mold with electromagnetic brake [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2003 ,133(3) :322 – 329.

[11] Launder B E ,Spalding D E. The numerical computations of turbulent flow [J]. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering* ,1973(3) :269 – 271.